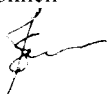


A
H632

На правах рукописи



НИКОЛАЕВА Екатерина Владимировна

КИНЕТИКА ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ
В ОДНООСНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ

01.04.07. -- физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
Уральского Госуниверситета
г.Екатеринбург

Екатеринбург -- 2002

Работа выполнена в отделе оптоэлектроники и полупроводниковой техники НИИ физики и прикладной математики Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Научный руководитель –

кандидат физико-математических наук, с.н.с.
В.А. Важенин

Официальные оппоненты –

доктор физико-математических наук, профессор
А.С. Москвин

доктор физико-математических наук, профессор
В.Г. Гавриляченко

Ведущее учреждение –

Воронежский государственный технический университет

Защита состоится « 13 » июня 2002 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в Уральском государственном университете им. А.М. Горького (620083, г. Екатеринбург, К-83, пр. Ленина 51, комн. 248).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Автореферат разослан « 7 » мая 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
с.н.с.



Н.В. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Наличие доменной структуры, изменяющейся под действием электрического поля, является атрибутивным свойством сегнетоэлектриков. Изучение кинетики доменов в электрическом поле имеет фундаментальную научную значимость, поскольку сегнетоэлектрики являются удобным объектом для исследования кинетики фазовых переходов первого рода – одной из важнейших областей физики конденсированного состояния.

Многие свойства сегнетоэлектриков зависят от параметров доменной структуры, однако, решение проблемы ее управляемого изменения еще далеко от завершения. Следует отметить, что процессы переключения в сегнетоэлектриках и ферромагнетиках существенно различаются. Внешнее и объемное экранирование деполаризующих полей приводит к зависимости кинетики и статики сегнетоэлектрических доменов от свойств поверхностных слоев и объемной проводимости, а также к различным релаксационным процессам. Основное внимание при исследовании процесса переключения обычно уделяется интегральным измерениям, хотя очевидно, что только прямые наблюдения кинетики доменов могут дать исчерпывающую информацию о механизмах переключения поляризации. В данной работе большое внимание уделено сопоставлению результатов, полученных классическими интегральными методами, с прямыми наблюдениями кинетики доменов.

Актуальность исследования кинетики доменной структуры обусловлена использованием сегнетоэлектриков в устройствах опто- и акустоэлектроники и вычислительной техники. В частности, для преобразования длины волны лазерного излучения в нелинейно-оптических устройствах необходимо с высокой точностью контролировать параметры периодической доменной структуры, что требует детального изучения кинетики доменных границ. Монокристаллы ниобата лития и танталата лития, исследуемые в работе, наиболее перспективны для этого применения, благодаря рекордным нелинейно-оптическим характеристикам.

Целью работы являлось развитие физических представлений о кинетике доменных границ в электрическом поле с учетом влияния внешнего и объемного экранирования и взаимодействия с дефектами в реальных одноосных сегнетоэлектриках. Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- Создать экспериментальную установку для комплексного исследования кинетики доменной структуры в сегнетоэлектриках, позволяющую одновременно регистрировать последовательность мгновенных доменных конфигураций и ток переключения.
- Исследовать движение одиночной плоской доменной стенки и ее взаимодействие с искусственными дефектами в модельном сегнетоэлектрике сегнетоэластике молибдате гадолия.
- Изучить немонотонное движение нескольких ориентированных доменных стенок в сегнетоэлектриках с дефектами на примере ниобата лития и танталата лития. Провести компьютерное моделирование движения плоской доменной стенки в образце с дефектами, локально повышающими пороговое поле переключения поляризации.

- Экспериментально исследовать движение доменных стенок за счет слияния с изолированными доменами на примере конгруэнтного танталата лития и провести компьютерное моделирование этого процесса.
- С высоким пространственным разрешением изучить форму изолированных доменов в ниобате лития и танталате лития при помощи сканирующего зондового микроскопа с использованием контактной атомно-силовой и пьезоэлектрической мод. Провести компьютерное моделирование роста изолированного домена в сегнетоэлектрическом монокристалле с симметрией C_3 .
- Исследовать самоорганизованные доменные структуры, образующиеся в результате сверхбыстрого движения доменных границ при самопроизвольном обратном переключении в ниобате лития.
- Изучить в ниобате лития кинетику формирования устойчивых доменных структур с заряженными доменными стенками под действием электрического поля вдали от температуры фазового перехода.

Объекты исследования. В качестве модельного материала был выбран сегнетоэлектрик-сегнетоэластик молибдат гадолиния $Gd_2(MoO_4)_3$ (GMO), в котором удалось реализовать переключение за счет движения одиночной плоской доменной стенки. При использованной геометрии образца ток переключения был пропорционален скорости стенки, что существенно облегчало анализ.

В качестве реальных кристаллов использовались монокристаллы ниобата лития $LiNbO_3$ (LN) и танталата лития $LiTaO_3$ (LT). Эти классические нелинейно-оптические материалы обычно выращиваются конгруэнтного состава с большой концентрацией дефектов. До недавнего времени они считались "замороженными" сегнетоэлектриками из-за гигантского коэрцитивного поля (210 кВ/см при комнатной температуре). Исследования переключения в LN и LT начались сравнительно недавно. В связи с созданием регулярных доменных структур для нелинейно-оптических устройств недавно были разработаны методы выращивания кристаллов с составом близким к стехиометрическому. При переходе к стехиометрическим кристаллам качественно изменяется кинетика и статика доменов, и на порядок уменьшаются коэрцитивные поля. В работе исследовались LN и LT конгруэнтного (CLN и CLT) и стехиометрического (SLN и SLT) составов, а также ниобат лития, легированный магнием (MgO:LN).

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые проведенное исследование движения одиночной плоской доменной стенки за счет генерации и роста ступеней и ее взаимодействия с искусственными дефектами в модельном сегнетоэлектрике-сегнетоэластике молибдате гадолиния позволило определить пороговые поля, предложить механизмы взаимодействия стенок с дефектами и получить полевые зависимости скорости роста ступеней.
- При изучении немонотонного движения ориентированных доменных стенок в CLN, SLN и SLT впервые измерена скорость роста микроступеней. Из статистического анализа скачков тока показано, что кинетика стенок демонстрирует поведение, типичное для самоорганизованных процессов.

Предложен и исследован методами компьютерного моделирования новый механизм скачкообразного движения доменных стенок.

- В CLT обнаружен и исследован экспериментально и методами компьютерного моделирования новый механизм быстрого движения доменных стенок за счет слияния движущейся стенки с изолированными доменами. Справедливость предложенного механизма подтверждена сопоставлением формы тока переключения с результатами компьютерной обработки экспериментальной последовательности мгновенных изображений доменной структуры.
- Исследована форма изолированных доменов в LN и LT с использованием микроскопии высокого разрешения, и впервые обнаружены домены-многоугольники с со существованием x и y сторон. Полученное разнообразие форм доменов объяснено с помощью компьютерного моделирования роста изолированного домена.
- Впервые экспериментально обнаружено формирование самоорганизованных дендритных структур, состоящих из субмикронных доменов, образующихся в результате сверхбыстрого движения фронта переключения при самопроизвольном распаде неравновесной доменной структуры в MgO:LN .
- Впервые на примере CLN, SLN и MgO:LN исследовано формирование устойчивых доменных структур с заряженными доменными стенками вдали от температуры фазового перехода при низкой объемной проводимости. Предложен механизм формирования самоорганизованных структур с заряженными доменными стенками.

Практическая ценность представленной работы обусловлена растущим применением ниобата лития и танталата лития с периодической доменной структурой в нелинейно-оптических устройствах [1,2]. Домены разного знака различаются направлением кристаллографических осей, поэтому при распространении света через периодическую доменную структуру удастся реализовать условие квази-фазового синхронизма, что позволяет с высокой эффективностью изменять длину волны лазерного излучения. Для реализации различных оптических преобразований необходимо контролируемо создавать доменную структуру со строго определенными параметрами: периодом и соотношением ширины доменов разных знаков. Актуальным для применения является создание однородной регулярной доменной структуры длиной до 50 мм с периодом от 4 до 20 микрон в пластинах толщиной 0.5-2 мм. Детальное исследование кинетики доменов в этих материалах необходимо для разработки подхода к созданию доменных структур с заданными параметрами (domain engineering).

На защиту выносятся:

1. Объяснение полученных экспериментальных результатов по кинетике доменов в рамках единого подхода, рассматривающего движение доменных стенок как результат генерации и роста ступеней с учетом запаздывания объемного экранирования деполяризующих полей.

2. Механизмы взаимодействия доменных стенок с дефектами и полевые зависимости скорости роста ступеней для движения одиночной плоской доменной стенки в модельном сегнетоэлектрике-сегнетоэластике молибдате гадолиния с искусственными дефектами.
3. Новый механизм скачкообразного движения ориентированных доменных стенок в CLN, SLN и SLT. Экспериментальное изучение роста отдельных микроступеней на стенке, подтверждающее используемую модель.
4. Новый механизм движения доменных стенок за счет слияния с изолированными доменами, обнаруженный и исследованный в CLT, который на два порядка увеличивает скорость движения стенок.
5. Различные формы микро- и макро-доменов в LN и LT, включая домены-звезды и многоугольники, содержащие одновременно x и y стороны, и объяснение их возникновения за счет конкуренции двух типов пристеночного зародышеобразования.
6. Формирование самоорганизованных дендритных структур, состоящих из субмикронных доменов, при самопроизвольном распаде неравновесной доменной структуры в MgO:LN.
7. Возможность создания и механизм формирования самоорганизованных устойчивых доменных структур с заряженными доменными стенками вдали от температуры фазового перехода при низкой объемной проводимости в CLN, SLN и MgO:LN.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на 30 Всероссийских и Международных конференциях, в том числе на 7^{ом} и 8^{ом} Международных семинарах по физике сегнетоэлектриков-полупроводников (1996 и 1998 гг, Ростов-на-Дону), Materials Research Society Fall Meeting (MRSFM: 1997, 2000, 2001, Boston, USA), Materials Research Society Spring Meeting (MRSSM 1998, San Francisco, USA), International Conference on Electroceramics and their Applications (1998, Montreux, Switzerland), 6th Japan-CIS/Baltic Symposium on Ferroelectricity (1998, Tokyo, Japan), 11th, 12th International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF: 1998, Montreux, Switzerland; 2000, Honolulu, Hawaii), 5th, 6th International Symposium on Ferroic Domains and Mesoscopic Structures (ISFD: 1998, State College, USA; 2000, Nanjing, China), CNOM Annual Affiliates Meeting (1999, Stanford, USA), 9th European Meeting on Ferroelectricity (EMF 1999, Praha, Czech Republic), 15^{ой} Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (1999, Ростов-на-Дону), 2^{ой} и 3^{ей} Всероссийских семинарах "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении" (1999, 2000, Воронеж), 11th, 12th, 13th International Symposium on Integrated Ferroelectrics (ISIF: 1999, Colorado Springs, USA; 2000 Aachen, Germany; 2001, Colorado Springs, USA), 3^{ей} Международном семинаре по физике сегнетоэластиков (2000, Воронеж), 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials (2000, Newport Beach, USA), 3^{ей} Международном семинаре по релаксорным сегнетоэлектрикам (2000, Дубна), 5th European Conference on the Application of Polar Dielectrics (2000, Jurmala, Latvia), 1th International Meeting on Ferroelectric Random Access Memories (2001, Gotemba, Ja-

pan), 10th International Meeting on Ferroelectricity (IMF 2001, Madrid, Spain), Школе-семинаре "Актуальные проблемы неорганического материаловедения" (2001, Дубна), International Workshop on Periodic Microstructured Nonlinear Optical Materials (2001, Madrid, Spain), International Joint Conference on the Applications of Ferroelectrics (2002, Nara, Japan) и Международной школе-семинаре "Нелинейные процессы в дизайне материалов" (2002, Воронеж).

Публикации и личный вклад автора. Основные результаты исследований были опубликованы в 96 печатных работах, из них 18 статей во всероссийских и зарубежных реферируемых печатных изданиях. Диссертационная работа была выполнена в лаборатории сегнетоэлектриков НИИ ФПМ при Уральском государственном университете им. А.М. Горького в рамках исследований, проводимых по государственной научной программе № 2.61.00 "Изучение эволюции микро- и нанодоменов в сегнетоэлектриках и релаксорах", при частичной поддержке грантов РФФИ № 96-02-19588 и №01-02-17443, Программ "Университеты России: Фундаментальные Исследования" (гранты № 5563 и УР.06.01.031), "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники. Электроника" (грант № 03-03-29), Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (грант №REC-005), а также стипендий Международного фонда Сороса (1997, 1998, 1999, 2000, 2001 гг.) и Президента Российской Федерации (2000/01 и 2001/02 учебный год).

Представленные в работе результаты исследований кинетики доменной структуры в LN и LT были представлены Советом РАН по физике сегнетоэлектриков и диэлектриков для включения в список важнейших достижений РАН в 1999, 2000 и 2001 гг. Стендовые доклады были признаны лучшими в своих секциях на: 1) ISFD'5, 1998, State College, USA; 2) ISFD'6, 2000, Nanjing, China; 3) 3^{em} Всероссийском семинаре "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении", 2000, Воронеж, 4) Школе-семинаре "Актуальные проблемы неорганического материаловедения", 2001, Дубна, 5) Международной школе-семинаре "Нелинейные процессы в дизайне материалов", 2002, Воронеж.

Все основные результаты работы были получены лично автором. Обсуждение направления исследований и результатов и формулировка задач проводились совместно с научным руководителем В.А. Важениным, профессором В.Я. Шуром и Е.Л. Румянцевым. Экспериментальные измерения в LN и LT проводились совместно с Е.И. Шишкиным. Компьютерная реализация модели переклечения в CLT и роста изолированного домена проводилась совместно с А.П. Черных. Соавторы публикаций R.G. Batchko, G.D. Miller, R.K. Route, M.M. Fejer и R.L. Byer (Stanford University, USA) предоставили образцы CLN и CLT, К. Terabe и К. Kitamura (NIMS, Japan) – образцы SLN, MgO:LN и SLT.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 182 страницы, включая 84 рисунка, 2 таблицы и библиографию из 269 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, освещается современное состояние проблемы, формулируются основные цели и задачи работы, кратко излагается содержание диссертации и основные научные положения, которые выносятся на защиту.

Первая глава является обзорной. В ней рассматриваются основные методы исследования процесса переключения поляризации в сегнетоэлектриках: способы визуализации доменной структуры и измерения интегральных характеристик. Приводится обзор экспериментальных результатов исследования процессов переключения, выделяются основные стадии эволюции доменной структуры, описываются теоретические модели движения доменных границ одноосных сегнетоэлектриков. Рассмотрены механизмы экранирования деполяризующих полей и влияние запаздывания объемного экранирования на движение доменных стенок. Подробно описываются методы анализа тока переключения: анализ формы низкочастотной компоненты и статистический анализ высокочастотной компоненты, позволяющие извлекать детальную информацию о кинетике процесса. Приводятся основные физические свойства исследуемых материалов.

Вторая глава является методической. В ней описана экспериментальная установка для комплексного исследования процессов переключения, приведены использованные методики эксперимента, способы визуализации доменных структур, а также основные параметры и способы подготовки исследуемых образцов.

Молибдат гадолиния. Исследуемые монокристаллы GМО были выращены по методу Чохральского в НИИ ФПМ при УрГУ. Прямоугольные пластины с типичными размерами $7 \times 2 \times 0.39 \text{ мм}^3$ были вырезаны перпендикулярно полярной оси с боковыми гранями параллельными когерентным ориентациям доменных стенок. Все грани пластин шлифовали и полировали алмазными пастами. На полярные грани методом реактивного распыления наносили прозрачные электроды $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO). Перед измерениями с помощью механического воздействия создавали одиночную плоскую доменную стенку (ПДС), параллельную меньшей грани пластины. Для регистрации токов переключения при циклическом перемещении ПДС прикладывали знакопеременные треугольные импульсы напряжения амплитудой до 300 В с частотой 30-100 Гц.

Ниобат лития и танталат лития. Пластины CLN и CLT диаметром 76 мм и толщиной 0.5 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси, были изготовлены фирмой Crystal Technology, CA, USA. Монокристаллы выращивались по методу Чохральского вытягиванием в направлении полярной оси. Полярные грани пластин шлифовали и полировали алмазными пастами. Пластины толщиной 0.5-1 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси SLN, SLT и $\text{MgO}:\text{LN}$ с составом, близким к стехиометрическому, были изготовлены фирмой Oxide Corporation, Koubuchisawa, Japan и Single Crystal Group, National Institute for Material Science, Tsukuba, Japan. Монокристаллы выращивались из расплава с повышенной концентрацией Li вытягиванием вдоль полярной оси модифицированным методом Чохральского с использованием двойного тигля. Переключение проводилось с ис-

пользованием двух типов прозрачных электродов: ИТО и жидкий электролит (водный раствор LiCl).

Эволюция доменной структуры в LN и LT наблюдалась во всей переключаемой области при помощи поляризационного микроскопа в проходящем свете. Непосредственно при переключении одновременно регистрировались последовательность мгновенных доменных конфигураций при помощи видеокамеры и ток переключения. При циклическом переключении с воспроизводимой кинетикой доменов использовалось стробоскопическое освещение, обеспечивающее разрешение по времени около 1 мкс. Сопоставление тока с результатами компьютерной обработки последовательности изображений доменной структуры позволило связать особенности формы тока с кинетикой доменов.

Статическая доменная структура выявлялась селективным химическим травлением, благодаря различию скоростей травления доменов разного знака. Полученный поверхностный рельеф визуализировался при помощи оптического микроскопа или сканирующего зондового микроскопа в контактной атомно-силовой моде. В этой моде регистрировалось взаимодействие зонда с поверхностью образца за счет близкодействующих сил Ван-дер-Ваальса, что позволяло измерять рельеф с нанометровым горизонтальным и субнанометровым вертикальным разрешением. Статические домены визуализировались также без травления при помощи поляризационного микроскопа и сканирующего зондового микроскопа в пьезоэлектрической моде. Для реализации пьезомоды между проводящим зондом и нижним электродом прикладывалось переменное электрическое поле, что приводило к колебанию поверхности образца за счет пьезоэффекта. При сканировании регистрировался локальный пьезоотклик, пропорциональный величине спонтанной поляризации.

В третьей главе представлены результаты модельного эксперимента по движению ПДС в молибдате гадолиния. При переключениях в полях, незначительно превышающих пороговое, наблюдалась остановка ПДС и возвращение ее в исходное положение после выключения поля [3]. Исследование процесса формовки (увеличения максимального смещения стенки при циклическом переключении) позволило выявить изменение поля объемного экранирования с характерными временами релаксации 12 с и 180 с.

Аппроксимация полевой зависимости смещения стенки в широком интервале полей соотношением, учитывающим запаздывание объемного экранирования [4], позволила определить пороговое поле E_{th} . Обнаружены малые смещения в полях меньше порогового, обусловленные неполным объемным экранированием вблизи исходного положения ПДС.

Для исследования влияния предистории образец длительное время циклически переключался в поле постоянной амплитуды с фиксированным максимальным смещением Δx_{maxI} . При последующем измерении зависимости максимального смещения Δx_{max} от внешнего поля E_{ex} наблюдался излом при переходе в область смещений, превышающих Δx_{maxI} (Рис. 1) и гистерезис смещений при росте и уменьшении амплитуды поля. При описании зависимости $\Delta x_{max}(E_{ex})$ учитывалось запаздывание экранирования деполяризующего поля [5]

$$E_{ex} = \begin{cases} E_{th} + \frac{P_s L}{\varepsilon_L \varepsilon_o d} (1 + k_1) F(\Delta x_{max} / d) & \text{при } \Delta x_{max} < \Delta x_{max I} \\ E_{th} + \frac{P_s L}{\varepsilon_L \varepsilon_o d} [(1 + k_1) F(\Delta x_{max} / d) + (1 + k_2) F((\Delta x_{max} - \Delta x_{max I}) / d)] & \text{при } \Delta x_{max} > \Delta x_{max I} \end{cases} \quad (1)$$

где $F(x) = \pi^{-1} \{2 \arctg(x) + x \ln[1/x^2 + 1]\}$, P_s – спонтанная поляризация, L и ε_L – толщина и диэлектрическая проницаемость поверхностного диэлектрического слоя, d – толщина образца, k_i – степень экранирования.

Использование соотношения (1) для аппроксимации экспериментальных результатов (Рис. 1) позволило определить ступенчатое изменение рельефа поля объемного экранирования (Рис. 1, на вставке).

Предложенное описание изменения внутренних полей использовалось при разработке нового кинетического подхода для объяснения эффекта усталости в сегнетоэлектриках. Рассматривалось самосогласованное изменение площади и геометрии переключаемой части образца при циклическом переключении, сопровождаемое возникновением и ростом кинетически "замороженных" доменов. Считалось, что эффект усталости обусловлен самоорганизованным формированием пространственно неоднородного внутреннего поля смещения, благодаря запаздыванию объемного экранирования деполяризующего поля. Изменения величины переключаемого заряда и амплитуды тока переключения, полученные компьютерным моделированием кинетики доменов при циклическом переключении, хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в тонких пленках цирконата-титаната свинца, керамике и монокристаллах.

Впервые был реализован модельный эксперимент, позволяющий исследовать немонотонное движение ПДС при взаимодействии с искусственными центрами пиннинга. Для этого был создан специальный электрод с дефектами на краях, которые приводили к локальному уменьшению приложенного поля. Замедление движения ПДС в области дефекта приводило к отклонению тока переключения от линейной зависимости при измерении в линейно растущем поле (скачку Баркгаузена). В слабых полях наблюдались только отрицательные скачки, а в сильных полях – положительные (Рис. 2).

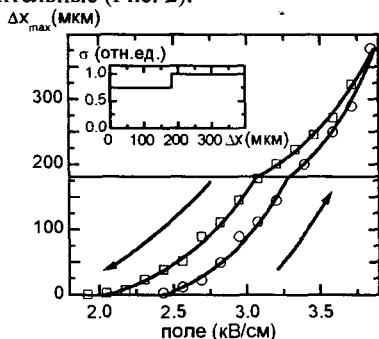


Рис. 1. Полевая зависимость Δx_{max} при увеличении и последующем уменьшении амплитуды поля. Экспериментальные точки аппроксимированы соотношением (1). На вставке – пространственное распределение поверхностной плотности зарядов объемного экранирования.

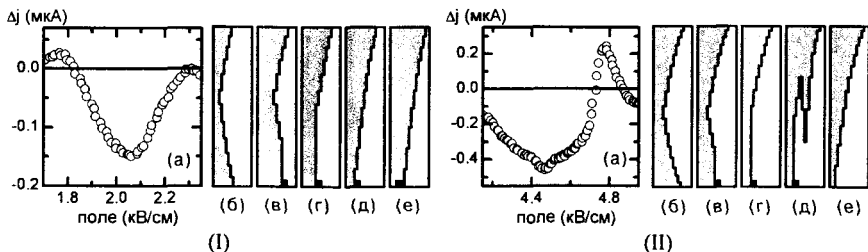


Рис. 2. (I) Отрицательный и (II) положительный скачки Баркгаузена и соответствующие схемы эволюции формы ПДС.

Форма скачков была объяснена в рамках модели движения стенки за счет пристеночного зародышеобразования [6]. Ступени размерами менее 100 нм экспериментально наблюдались на статической доменной стенке в GMO при помощи сканирующего зондового микроскопа в пьезоде. Предполагалось, что ступени образуются на пересечении стенки и края образца и растут вдоль стенки. Ток переключения пропорционален произведению количества ступеней на их скорость. Анализ отклонения тока от линейной зависимости, соответствующей свободному движению стенки без дефектов, позволил предложить схемы эволюции формы стенки при взаимодействии с дефектом (Рис. 2). В области дефекта генерация ступеней прекращается. В слабом поле это приводит к незначительному изменению формы стенки (Рис. 2.I) и отрицательному скачку в токе. В сильном поле при критическом отклонении стенки от когерентного направления происходит образование клина (Рис. 2.II), вершина которого движется со значительно большей скоростью, чем обычная ступень, что приводит к положительному скачку в токе. Анализ последовательности скачков позволил получить линейную полевую зависимость скорости ступеней с пороговым полем 1.05 кВ/см и подвижностью 1.4 см²/Вс, что на два порядка больше подвижности стенки [3].

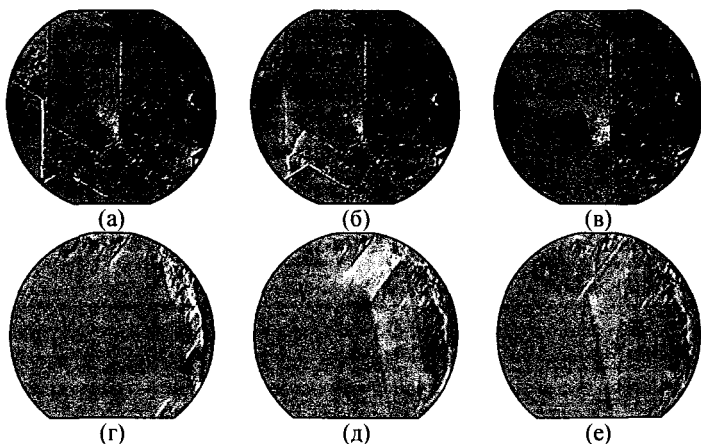


Рис. 3. *In situ* наблюдение эволюции доменной структуры в (а), (б), (в) CLN ($E_{ex} = 220$ кВ/см) и (г), (д), (е) SLT ($E_{ex} = 32$ кВ/см). Диаметр переключаемой области 1 мм. Жидкие электроды.

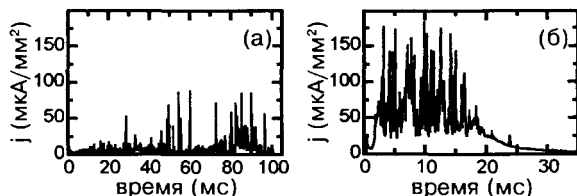


Рис. 4. Ток переключения в SLT с площади в 1 мм^2 . E_{ex} , кВ/см: (а) 20, (б) 33. Жидкие электроды.

Четвертая глава посвящена изучению особенностей процесса переключения при одновременном движении нескольких ПДС, наблюдающемся в CLN, SLN и SLT. Образование доменов происходило в момент включения поля под краями электрода или на дефектах (Рис. 3а,г). В результате последующего роста формировались доменные стенки, ориентированные вдоль выделенных кристаллографических направлений (Рис. 3в,д,е). При дальнейшем переключении наблюдалось их скачкообразное движение. Стенки покоились в течение времени отдыха и затем быстро перескакивали в новое положение. Каждый скачок приводил к короткому импульсу в токе (Рис. 4).

Детальное наблюдение показало, что боковое движение стенки является результатом роста микроступеней (Рис. 5). Из анализа последовательности мгновенных доменных конфигураций была определена средняя скорость микроступени 1-2 мм/с в поле, близком к пороговому ($E_{ex} = 220 \text{ кВ/см}$). Обнаружена аномально быстрая перестройка доменной структуры после слияния изолированных доменов при изменении формы от вогнутой к выпуклой (Рис. 3б). При этом каждая из стенок служит постоянным источником растущих ступеней и увеличение скорости переключения обусловлено одновременным движением большого числа ступеней.

При анализе токов переключения в слабых полях удалось разделить импульсы, соответствующие отдельным скачкам (Рис. 4а). В сильных полях одновременные скачки нескольких стенок приводили к наложению токовых импульсов (Рис. 4б). Для анализа скачкообразных токов переключения были использованы статистические методы, разработанные для исследования шумов и фрактальных временных рядов [7,8].

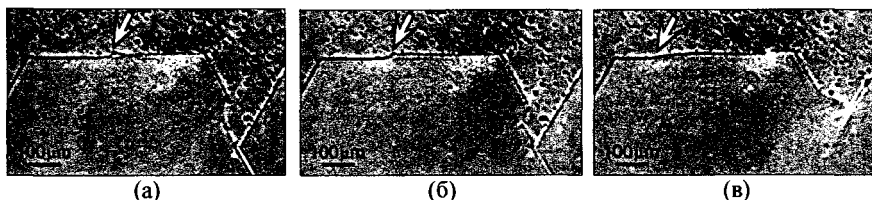


Рис. 5. Рост микроступени вдоль доменной стенки в CLN. $E_{ex} = 220 \text{ кВ/см}$. Жидкие электроды.

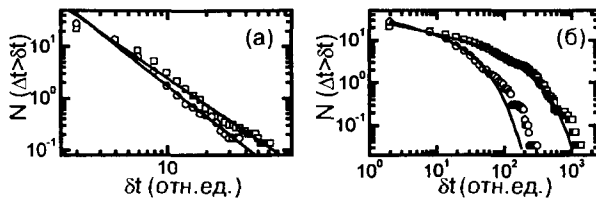


Рис. 6. Анализ токов переключения в SLT. Кумулятивные функции распределения (а) длительности токового импульса и (б) времени отдыха. Аппроксимация (а) степенной зависимостью и (б) соотношением (2). $E_{ex} = 20$ кВ/см. Жидкие электроды.

Статистический анализ методом Корчака [7,8] позволил определить кумулятивные функции распределения $N(\Delta t > \delta t)$ длительности индивидуальных импульсов и времени отдыха. Функция распределения длительности токовых импульсов (Рис. 6а) демонстрирует степенную зависимость, т.е. инвариантное относительно масштабирования поведение, типичное для самоорганизованных процессов. Для времени отдыха (Рис. 6б) степенной закон наблюдается только в узком временном интервале. Аппроксимация экспериментальных данных проводилась функцией, учитывающей ограниченный диапазон скейлинга:

$$N(\Delta t > \delta t) = B \delta t^{-\alpha} \exp(-\delta t/\xi) \quad (2)$$

где $N(\Delta t > \delta t)$ – число отрезков с длиной, превышающей δt ; α – показатель скейлинга; ξ – фрактальное время корреляции.

В результате аппроксимации были определены параметры $\alpha = 0.33$ и $\xi = 5$ мс. Оценка показывает, что время отдыха ПДС должно быть существенно меньше постоянной времени объемного экранирования. Кроме того, экспериментально определяемое время отдыха уменьшается за счет того, что в образце одновременно и независимо двигаются несколько доменных стенок. Такой вывод подтверждается полученным соотношением между значением ξ и постоянной времени объемного экранирования в SLT и CLN (порядка 40-50 мс).

Был предложен механизм скачкообразного движения доменной стенки, учитывающий запаздывание процессов объемного экранирования. Предполагалось, что локальное поле на движущейся доменной стенке уменьшается за счет растущего шлейфа незаэкранированного деполяризующего поля. Дефекты, локально увеличивающие пороговое поле, играют роль центров пиннинга и приводят к остановке стенки, когда локальное поле на стенке оказывается меньше локального порогового поля. Экранирование поля в шлейфе за время отдыха приводит к увеличению локального поля на стенке. Как только локальное поле превышает локальное пороговое поле, стенка продолжает свое движение. Время отдыха стенки зависит от разности локального поля на стенке в момент остановки и локального порогового поля. Длительность токовых импульсов определяется пространственным распределением дефектов и их пороговых полей.

Предложенная модель была исследована при помощи компьютерного моделирования. Локальное поле на стенке вычислялось с учетом запаздывания внутреннего экранирования остаточного деполяризующего поля. Применимость пред-

ложенной модели подтверждается близостью результатов статистического анализа экспериментальных токов переключения и токов, полученных моделированием с использованием экспериментально определенных значений параметров модели.

Было показано существенное влияние рентгеновского облучения на кинетику доменной структуры в SLT, которое приводит к исчезновению поля смещения на петле гистерезиса. Полученные результаты объяснялись в предположении, что рентгеновское излучение приводит к индуцированному распаду метастабильной сегнетоэлектрической фазы. Образующиеся включения несегнетоэлектрической фазы являются центрами зародышеобразования как при прямом, так и при обратном переключении. Кроме того, прямое наблюдение показало, что эти включения играют роль центров пиннинга при движении доменной стенки.

В пятой главе исследовался механизм движения доменной стенки за счет слияния с изолированными доменами в CLT. Переключение из монодоменного состояния начиналось с появления изолированных микродоменов с плотностью, достигающей 1000 мм^{-2} . Дальнейшее переключение осуществлялось только за счет роста доменов (Рис. 7).

Было выделено три скорости роста доменов: медленная v_z для изолированных доменов, быстрая v_y и сверхбыстрая v_{zf} при слиянии доменов (Рис. 8). Быстрое движение в трех u^+ направлениях является результатом генерации ступеней за счет слияния движущейся стенки с изолированными доменами и последующего роста ступеней. При слиянии крупных доменов формируются сверхбыстрые доменные стенки с большой концентрацией ступеней, что приводит к аномально быстрому движению в u^+ направлениях. Были измерены значения скоростей доменных стенок для переключения в поле 190 кВ/см : $v_z \sim 1 \text{ мкм/с}$, $v_y \sim 20\text{-}60 \text{ мкм/с}$, $v_{zf} \sim 130 \text{ мкм/с}$. Поскольку быстрое движение стенок на два порядка превышает медленное, процесс переключения определяется не ростом индивидуальных доменов, а ростом ступеней, возникающих в результате слияния доменов. Предложенная модель движения доменной стенки была исследована и подтверждена при помощи компьютерного моделирования (Рис. 8).

Токи переключения, полученные в результате компьютерного моделирования (Рис. 9а), аппроксимировались суммой двух вкладов. Слияние исходных изолированных доменов соответствует начальному спаду тока по степенному закону. Основная часть тока аппроксимировалась модифицированной формулой Колмогорова-Аврами, обычно используемой для анализа формы токов переключения [9].

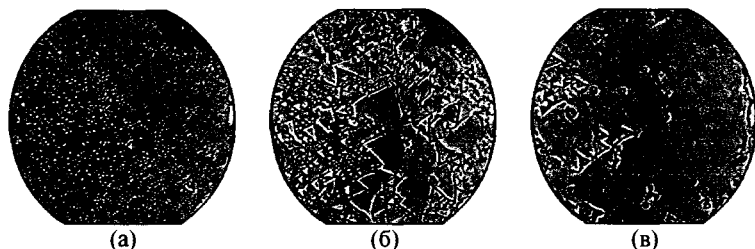


Рис. 7. Эволюция доменной структуры при переключении в CLT. Диаметр переключаемой области 1 мм . $E_{ex} = 190 \text{ кВ/см}$. Жидкие электроды.

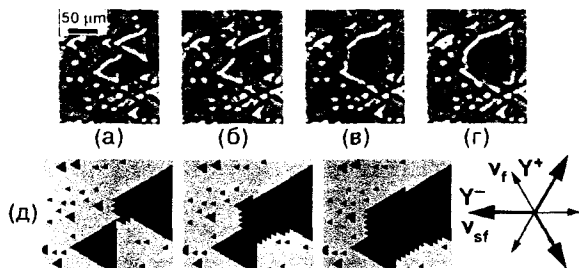


Рис. 8. Быстрое движение доменной стенки в y^+ направлениях и образование сверхбыстрой зигзагообразной доменной стенки, движущейся в y^- направлениях в CLT (а) 0.7 с, (б) 0.8 с, (в) 0.9 с, (г) 1 с от момента включения поля. $E_{ex} = 190$ кВ/см. *In situ* наблюдение в процессе переключения. (д) Моделирование кинетики доменов.

Впервые было проведено количественное сопоставление тока переключения (Рис. 8б) и "оптического тока" – приращения переключаемой площади, полученного при компьютерной обработке последовательности экспериментальных мгновенных доменных конфигураций (Рис. 8в). Форма оптического тока во всей переключаемой области подобна форме обычного тока переключения. Анализ оптического тока подтвердил, что экспериментально измеренный начальный спад тока обусловлен эволюцией доменной структуры, а не диэлектрическим вкладом.

Скачкообразная перестройка доменной структуры приводит к значительной немонотонности тока и появлению шумовой компоненты, которая была получена вычитанием аппроксимационной кривой из тока переключения (Рис. 8). Перестройка доменной структуры, приводящая к отдельным скачкам, была выявлена при анализе последовательности мгновенных доменных конфигураций.

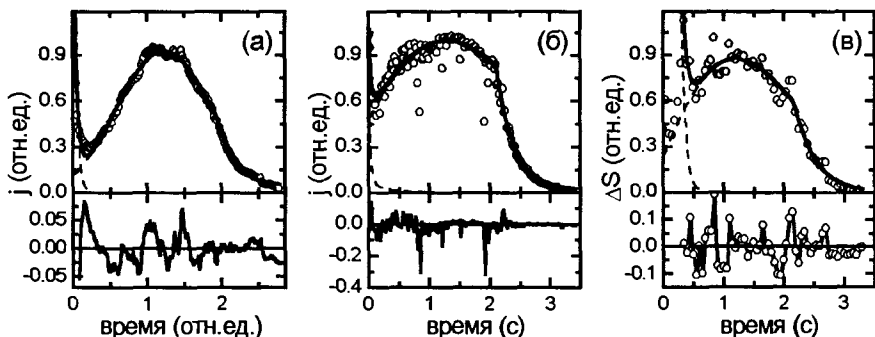


Рис. 9. Токи переключения и их шумовые компоненты в CLT: (а) результат компьютерного моделирования, (б) традиционный ток и (в) "оптический" ток. $E_{ex} = 190$ кВ/см.

Шестая глава посвящена изучению формы доменов как экспериментально, так и при помощи компьютерного моделирования. В CLN, SLN, MgO:LN и SLT наблюдаются равновесные шестиугольные домены, соответствующие симметрии кристаллов C_3 , со стенками, ориентированными вдоль y направлений. Вместе с тем в CLT обычно наблюдаются треугольные домены со стенками вдоль x направлений. При изменении переключаемых полей и параметров диэлектрического зазора в исследуемых материалах были получены разнообразные формы статических доменов (Рис. 10). Впервые были обнаружены домены в виде шестиконечных звезд и многоугольные домены, одновременно содержащие x и y доменные стенки. Исследование формы доменов с высоким пространственным разрешением с помощью сканирующей зондовой микроскопии показало, что рассмотренные особенности распространяются и на форму микродоменов. Полученное многообразие форм является доказательством того, что форма доменов определяется не только симметрией кристалла, но и условиями переключения. Компьютерное моделирование роста изолированных доменов с варьированием соотношения вероятностей для различных типов пристеночного зародышеобразования позволило получить все экспериментально наблюдаемые формы (Рис. 10).

Исследован новый тип сверхбыстрого движения доменных границ, проявляющегося в самоорганизованном формировании квазирегулярных структур, состоящих из цепей клиновидных доменов субмикронного диаметра, при самопроизвольном обратном переключении в MgO:LN после выключения или быстрого уменьшения переключающего поля. Вместо традиционного движения доменной стенки в этом случае распространяется фронт переключения, соответствующий росту цепей субмикронных доменов (Рис. 11а). Этот эффект является результатом самоподдерживающегося анизотропного зародышеобразования на определенном расстоянии от фронта переключения. Такой механизм движения ранее наблюдался

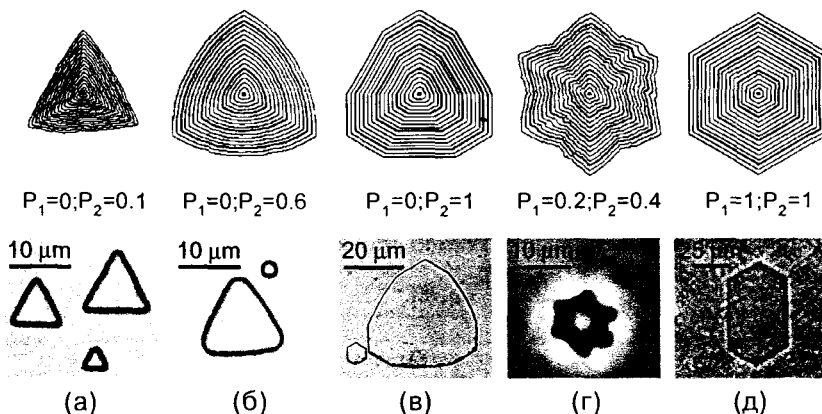


Рис. 10. Компьютерное моделирование роста изолированного домена с различным соотношением вероятностей двух типов пристеночного зародышеобразования и форма изолированных доменов в (а), (б) CLT, рельеф травления, отраженный свет; (в) CLN, рельеф травления, отраженный свет; (г), (д) SLT, без травления, проходящий свет.

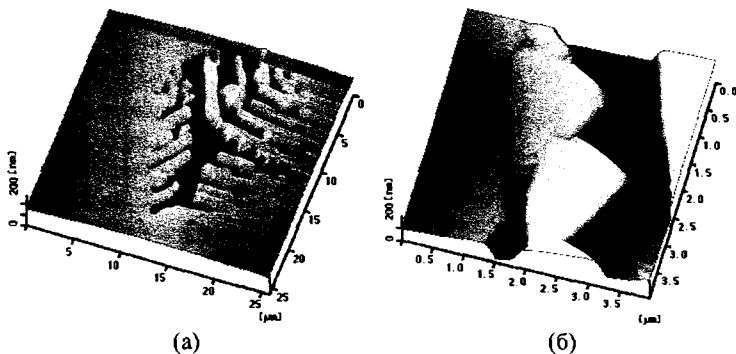


Рис. 11. (а) Квазирегулярные структуры субмикронных доменов и (б) особенности формы индивидуальных доменов при неравновесном переключении в MgO:LN. Изображение получено в контактной моде СЗМ.

в германате свинца [10]. Детальное исследование формы доменов показало, что отдельные домены имеют форму прямоугольных треугольников. Эта особенность свидетельствует о сосуществовании x и y стенок (Рис. 11б), что типично для неравновесного переключения поляризации при значительном запаздывании экранирования деполяризующих полей. Показано, что при значительном смещении фронта переключения от доменных границ возникающие структуры приобретают дендритную форму (Рис. 12) и могут покрывать площади порядка квадратных миллиметров.

Эффект самопроизвольного обратного переключения также использовался для объяснения различия температурных зависимостей спонтанной поляризации вблизи фазового перехода, полученных электрическими и оптическими методами, а также с использованием электронного парамагнитного резонанса, в германате свинца, легированном гадолинием.

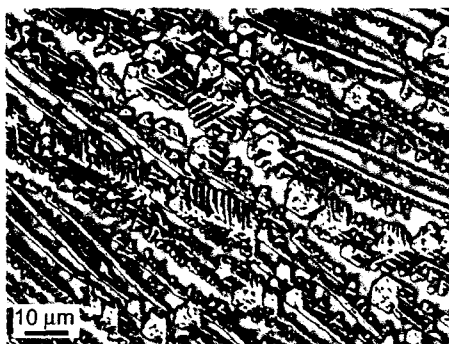


Рис. 12. Дендритная доменная структура в MgO:LN, оптическая визуализация рельефа травления в отраженном свете.



Рис. 13. Заряженная доменная стенка: (а) z^+ вид, (б) z^- вид, (в) y вид и (г) схема (y вид, белые стрелки указывают направление движения границы). Домены выявлены травлением, наблюдение в оптический микроскоп.

Седьмая глава посвящена исследованию формирования заряженных доменных стенок в CLN, SLN и MgO:LN . Кинетика доменной структуры в LN существенно зависит от типа используемых электродов. При переключении LN с ИТО электродами было впервые изучено образование стабильных доменных структур с заряженными доменными стенками (ЗДС) вдали от фазового перехода при низкой объемной проводимости. Принято считать, что формирование ЗДС не может быть реализовано в подобных условиях [11].

При приложении поля переключение начинается с зарождения клиновидных доменов по краям электрода на поверхности z^+ . В результате роста в полярном и боковом направлениях домены сливаются на z^+ , но не достигают z^- , формируя изолированные переключенные области с ЗДС (Рис. 13). Возникающая доменная структура сохраняется после выключения внешнего поля. Создаваемое ЗДС электрическое поле локально изменяет коэффициент преломления за счет электрооптического эффекта, что позволяет длительное время визуализировать статическую структуру после выключения поля.

Средняя скорость бокового движения границы ЗДС составила 40–60 $\mu\text{m/s}$ при $E_{ex} = 200 \text{ кВ/см}$. Показано, что положение и рельеф ЗДС существенно зависят от скорости ее распространения. При переключении в слабом поле ЗДС располагается вблизи поверхности z^+ , а в сильном поле – вблизи z^- . При касании вершиной клина z^- поверхности наблюдается аномально большой угол при вершине, достигающий 45° (Рис. 13в). Экспериментально установлено соответствие между рядами доменов на z^- поверхности и положением границы ЗДС при ее распространении. Квазирегулярная структура микродоменов указывает на механизм самоорганизованного формирования ЗДС.

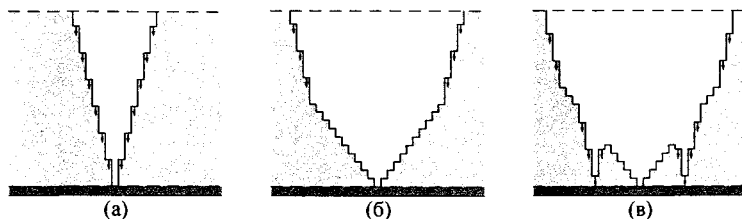


Рис. 14. Схема формирования заряженной доменной стенки.

При анализе механизма распространения ЗДС рост изолированных клиновидных доменов рассматривался как результат генерации ступеней на поверхности z' и их роста в полярном направлении (Рис. 14а). Скорость роста ступеней определялась величиной локального поля с учетом электростатического взаимодействия с заряженными концами соседних ступеней. Перераспределение носителей на электроде не может полностью скомпенсировать поле, создаваемое заряженной вершиной проросшего клиновидного домена, что замедляет рост соседних ступеней и приводит к аномальному отклонению стенки от полярного направления (Рис. 14б). При этом увеличивается деполяризующее поле на стенке, что вызывает генерацию дополнительного клина (Рис. 14в). Распространение ЗДС за счет многократного повторения рассмотренного цикла приводит к формированию самоорганизованной структуры. Среднее расстояние между зубцами ЗДС определяется толщиной приповерхностного диэлектрического зазора и приложенным полем. Образцы с ЗДС демонстрируют аномально большой диэлектрический отклик на малых частотах, что обусловлено чрезвычайно большой концентрацией подвижных ступеней.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Проведено комплексное исследование кинетики доменных стенок в модельном и реальных сегнетоэлектриках. Объяснение полученных экспериментальных результатов проведено в рамках предложенного единого подхода, рассматривающего движение доменных стенок как результат генерации и роста ступеней с учетом запаздывания объемного экранирования.
2. Впервые проведенное исследование движения одиночной плоской доменной стенки и ее взаимодействия с искусственными дефектами в модельном сегнетоэлектрике-сегнетоэластике молибдате гадолиния позволило предложить механизмы взаимодействия стенок с дефектами, а также получить и проанализировать полевые зависимости скорости роста ступеней.
3. При изучении немонотонного движения ориентированных доменных стенок в CLN, SLN и SLT впервые измерена скорость роста микроступеней. Статистический анализ скачков тока показал, что кинетика стенок демонстрирует поведение типичное для самоорганизованных процессов. Предложен и исследован методами компьютерного моделирования новый механизм скачкообразного движения доменных стенок.
4. В конгруэнтном танталате лития обнаружен и исследован экспериментально и методами компьютерного моделирования новый механизм движения доменных стенок за счет слияния движущейся стенки с изолированными доменами, что увеличивает скорость на два порядка. Справедливость предложенного механизма подтверждена сопоставлением тока переключения с результатами компьютерной обработки изображений доменной структуры.

5. Форма изолированных доменов в LN и LT исследована с использованием микроскопии высокого разрешения. Впервые обнаружены домены в форме звезд и многоугольников, одновременно содержащих x и y стороны. Обнаруженное многообразие форм получено также при компьютерном моделировании роста изолированного домена при изменении соотношения вероятностей различных типов пристеночного зародышеобразования.
6. Впервые экспериментально обнаружено формирование самоорганизованных дендритных структур, состоящих из субмикронных доменов, образующихся в результате сверхбыстрого движения фронта переключения при самопроизвольном распаде неравновесной доменной структуры в MgO:LN .
7. Впервые на примере ниобата лития показана возможность формирования устойчивых доменных структур с заряженными доменными стенками вдали от фазового перехода при низкой объемной проводимости. Предложен механизм их самоорганизованного формирования.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. L. Byer, Quasi-phasematched nonlinear interactions and devices, *J. Nonlinear Optical Physics & Materials*, 1997, V. 6, N. 4, pp. 549-592.
2. А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Р. И. Калимуллин, Индуцированные домены и периодические доменные структуры в электро- и магнитоупорядоченных веществах, *УФН*, 2000, Т. 170, вып. 7, с. 697-712.
3. В. Я. Шур, В. В. Летучев, Е. Л. Румянцев, Т. Б. Чарикова, Особенности динамики доменной структуры молибдата гадолиния при переполаризации электрическим полем, *ФТТ*, 1986, Т. 28, вып. 9, с. 2829-2832.
4. V. Ya. Shur, in *Ferroelectric thin films: synthesis and basic properties*, (Gordon&Breach, NY 1996) V. 10, Ch. 6, p. 193.
5. M. E. Drougard and R. Landauer, On the dependence of the switching time of barium titanate crystals on their thickness, *J. Appl. Phys.*, 1959, V. 30, N. 11, pp. 1663-1668.
6. R. C. Miller and G. Weinreich, Mechanism for the sidewise motion of 180° domain walls in barium titanate, *Phys. Rev.*, 1960, V. 117, N. 6, pp. 1460-1466.
7. Е. Федер, *Фракталы*, М.: Мир, 1990, с. 181.
8. J. Russ, *Fractal Surfaces*, NY, Plenum Press, 1994, 112 p.
9. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, and S. D. Makarov, Kinetics of phase transformations in real finite systems: application to switching in ferroelectrics, *J. Appl. Phys.*, 1998, V. 84, N. 1, pp. 445-451.
10. В. Я. Шур, А. Л. Груверман, Н. Ю. Пономарев, Е. Л. Румянцев, Н. А. Тонкачева, Кинетика доменной структуры при сверхбыстром переключении поляризации в германате свинца, *Письма в ЖЭТФ*, 1991, Т. 53, вып. 12, с. 591-594.
11. М. Лайнс, А. Гласс, *Сегнетоэлектрики и родственные им материалы*, М.: Мир, 1981, 736 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В. Я. Шур, Н. Ю. Пономарев, Н. А. Тонкачева, С. Д. Макаров, Е. В. Николаева, Е. И. Шишкин, Л. А. Суслов, Н. Н. Салашченко, Е. В. Ключенков, Явление усталости в эпитаксиальных пленках цирконата-титаната свинца, ФТТ, 1997, Т. 39, вып. 4, с. 694-696.
2. V. Ya. Shur, S. D. Makarov, N. Yu. Ponomarev, I. L. Sorkin, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, L. A. Suslov, N. N. Salashchenko, and E. V. Kluenkov, Fatigue in the epitaxial films of lead zirconate-titanate, J. Korean Phys. Soc., 1998, V. 32, pp. S1714-S1717.
3. В. Я. Шур, Е. Л. Румянцев, В. П. Куминов, А. Л. Субботин, Е. В. Николаева, Движение плоской доменной стенки в сегнетоэлектрике-сегнетоэластике молибдате гадолиния, ФТТ, 1999, Т. 41, вып. 1, с. 126-129.
4. V. Ya. Shur, E. V. Nikolaeva, E. L. Rumyantsev, E. I. Shishkin, A. L. Subbotin, and V. L. Kozhevnikov, Smooth and jump-like dynamics of the plane domain wall in gadolinium molybdate, Ferroelectrics, 1999, V. 222, pp. 323-331.
5. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, S. A. Makarov, V. L. Kozhevnikov, E. V. Nikolaeva, and E. I. Shishkin, How to learn the domain kinetics from the switching current data, Integrated Ferroelectrics, 1999, V. 27, pp. 179-194.
6. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, D. V. Fursov, R. G. Batchko, L. A. Eyres, M. M. Fejer, and R. L. Byer, Nanoscale backswitched domain patterning in lithium niobate, Appl. Phys. Lett., 2000, V. 76, N. 2, pp. 143-145.
7. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, R. G. Batchko, G. D. Miller, M. M. Fejer, and R. L. Byer, Regular ferroelectric domain array in lithium niobate crystals for nonlinear optic applications, Ferroelectrics, 2000, V. 236, pp. 129-144.
8. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, R. G. Batchko, G. D. Miller, M. M. Fejer, and R. L. Byer, Micro- and nanoscale domain engineering in lithium niobate and lithium tantalate, SPIE Proc. on Smart Structures and Materials, 2000, V. 3992, pp. 143-154.
9. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, and E. I. Shishkin, Formation and evolution of charged domain walls in congruent lithium niobate, Appl. Phys. Lett., 2000, V. 77, N. 22, pp. 3636-3638.
10. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, D. V. Fursov, R. G. Batchko, L. A. Eyres, M. M. Fejer, R. L. Byer, and J. Sindel, Formation of self-organized nanoscale domain patterns during spontaneous backswitching in lithium niobate, Ferroelectrics, 2001, V. 253, pp. 105-114.
11. В. Я. Шур, В. Л. Кожевников, Д. В. Пелегов, Е. В. Николаева, Е. И. Шишкин, Скачки Баркгаузена при движении одиночной сегнетоэлектрической доменной стенки, ФТТ, 2001, Т. 43, вып. 6, с. 1089-1092.

12. V. Ya. Shur, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, I. S. Baturin, D. Bolten, O. Lohse, and R. Waser, Fatigue in PZT thin films, MRS Sym. Proc., 2001, V. 655, pp. CC10.8.1-CC10.8.6.
13. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, and I. S. Baturin, Kinetic approach to fatigue phenomenon in ferroelectrics, J. Appl. Phys., 2001, V. 90, N. 12, pp. 6312-6315.
14. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, I. S. Baturin, M. Ozgul, and C. A. Randall, Kinetics of fatigue effect, Integrated Ferroelectrics, 2001, V. 33, pp. 117-132.
15. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, R. G. Batchko, M. M. Fejer, and R. L. Byer, Recent achievements in domain engineering in lithium niobate and lithium tantalate, Ferroelectrics, 2001, V. 257, pp. 191-202.
16. В. А. Важенін, В. Б. Гусева, В. Я. Шур, Е. В. Николаева, М. Ю. Артемов, Температурное поведение параметра порядка в $\text{Pb}_3\text{Ge}_3\text{O}_{11}$, ФТТ, 2001, Т. 43, вып. 10, с. 1875-1879.
17. V. Ya. Shur, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, V. L. Kozhevnikov, A. P. Chernykh, K. Terabe, and K. Kitamura, Polarization reversal in congruent and stoichiometric lithium tantalate, Appl. Phys. Lett., 2001, V. 79, N. 19, pp. 3146-3148.
18. V. Ya. Shur, E. B. Blankova, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, A. V. Barannikov, R. K. Route, M. M. Fejer, and R. L. Byer, X-ray-induced phase transformation in congruent and vapor-transport-equilibrated lithium tantalate and lithium niobate, Appl. Phys. Lett., 2002, V. 80, N. 6, pp. 1037-1039.

Отпечатано на принтере
в лаборатории сегнетоэлектриков НИИ ФПМ при УрГУ
Подписано к печати 30.04.2002, Формат 60x84 1/16,
Усл. печ. л. 1, Тираж 100 экз.